

赤外線法を利用した外壁 タイルの剥離評価に関する解析的研究

Analytical Study on Non-Destructive Evaluation of Tile Separation by Thermography Method

山田 和夫
Kazuo YAMADA

ABSTRACT In this study, the applicability of thermography method on the evaluation of tile separation was examined by using the three dimensional finite element method for the heat conduction analysis. The relationships between the degree of tile separation and the temperature distribution of tile surface were discussed. Following results were obtained in this study:

1) When the exterior air temperature is lower than the interior one, the surface temperature of tile separating from the concrete is higher than that of tile adhering to the concrete, but the former becomes lower than the latter in the case that the exterior air temperature is higher than the interior one.

2) The effect of tile separation on the temperature distribution of exterior wall increases with decreasing the separation depth, but the temperature distribution of interior wall is hardly affected by the tile separation.

3) It is necessary to clarify the combined effects of interior and exterior air temperatures on the temperature distribution of tile surface, so as to predict exactly the tile separation by the thermography method.

1. はじめに

コンクリート構造物の寿命は、通常70年～100年程度と考えられているが、昭和40年代以降の高度成長期に建設されたコンクリート構造物の一部に早期劣化が認められたことから、コンクリート構造物の耐久性設計や維持保全の重要性が社会的に認識されるようになってきた。特に外壁タイルの剥落による

人身事故は、最近大きな社会問題ともなっている。このような社会的背景から、近年建設時点において早期劣化を生じる可能性のある何らかの欠陥が構造物に潜在しているか否かを、またある期間経過した時点において構造物がどの程度劣化しているかを正確に調査し、その結果を踏まえて構造物の維持・管理に関して最も適切な措置を講ずるための一連の指針（案）作りが関連する学・協会で精力的に検討されている。ただし、供用中のコンクリート構造物の一部を部分的にしろ損傷して調査すると、調査後そ

の箇所の補修が必ず必要となり、調査箇所は自ずと制限されることになるため、コンクリート構造物を調査するための手法としての非破壊試験法の早期確立が強く望まれている。

筆者も、以上の点を踏まえて、従来からコンクリート構造物の劣化度評価を目的としたコンクリートの非破壊試験方法の確立を目的として一連の基礎的検討^{1)~10)}を行ってきたが、本研究では、外壁タイルの剥離評価を対象とした非破壊試験法について解析的に検討を行った。筆者らは、先に弾性波法を適用した外壁タイルの剥離評価の可能性と適用性について実験的および解析的検討を行い^{8)・9)}、検出波形の周波数特性と低周波数領域における共振周波数の出現状況に着目することによって、タイルの剥離状況がある程度正確に評価できる可能性のあることを報告した。本研究は、最近注目を集めているサーモグラフィ法による外壁タイルの剥離評価方法を確立するための基礎的研究として、まずアイソパラメトリック要素を用いた3次元熱伝導有限要素解析を行い、タイルの剥離状況と外壁温度の分布状況との相互関係について解析的に検討を行ったものである。

2. 解析方法

2.1 解析の概要

本解析では、3次元の定常熱伝導解析および非定常熱伝導解析の2シリーズの解析を行った。これらの熱伝導問題を支配する基礎微分方程式の有限要素式は、それぞれ次式で表される。

①定常熱伝導方程式：

$$[K]\{\Phi\} = \{F\} \dots\dots\dots (1)$$

②非定常熱伝導方程式：

$$[C]\{\partial\Phi/\partial t\} + [K]\{\Phi\} = \{F\} \dots\dots\dots (1)'$$

- ここに、 $\{\Phi\}$ ：節点温度ベクトル、
- $[K]$ ：熱伝導マトリクス、
- $[C]$ ：熱容量マトリクス、
- $\{F\}$ ：熱流束ベクトル。

また、本解析では、境界条件として次式で与えられる熱伝達境界を仮定した。

$$\kappa \frac{\partial T}{\partial n} = -\alpha (T - T_0) \dots (2)$$

- ここに、 κ ：熱伝導係数、
- T ：温度、

- n ：外向単位法線ベクトル、
- α ：熱伝達係数、
- T_0 ：外部温度。

なお、式(1)'の時間 t に関する1階の微分方程式の解法には、次式で表されるクランク・ニコルソン差分法を適用し、時間増分を Δt として所定の時刻まで繰返し計算を行った。

$$\begin{aligned} & \left[\frac{1}{\Delta t} [C] + \frac{1}{2} [K] \right] \{\Phi\}_{t+\Delta t} = \\ & \left[\frac{1}{\Delta t} [C] - \frac{1}{2} [K] \right] \{\Phi\}_t + \{F\} \\ & \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

2.2 解析モデル

解析の概要を表-1に示す。本解析では、図-1に示すように、厚さ1cmのタイルが30x30x15cmの平

Table.1 Outline of analysis.

Month	Separation condition		
	Size (cm)	Depth (cm)	Layers
2, 5	5x5	1.0	1
8, 11	10x10 25x25	3.9	2

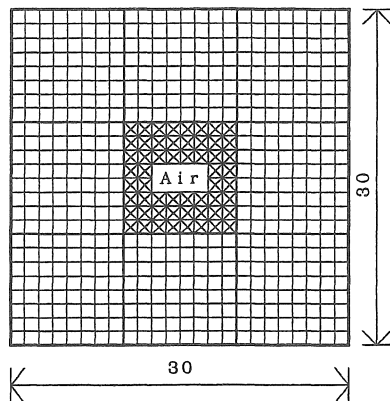
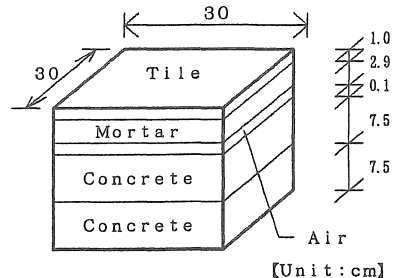


Fig.1 Example of analytical model.

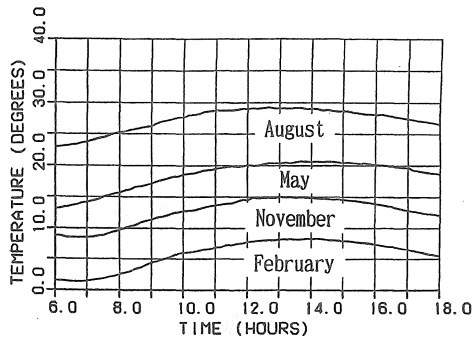


Fig. 2 Temperature history.

Table. 2 Properties of materials.

Properties	Tile	Concrete	Mortar	Air
Density ρ (g/cm ³)	2.3	2.3	2.0	1.0 × 10 ⁻³
Specific heat c (cal/g·°C)	0.18	0.21	0.27	0.25
Thermal conductivity κ (cal/cm·s·°C)	3.6 × 10 ⁻³	3.0 × 10 ⁻³	3.0 × 10 ⁻³	6.5 × 10 ⁻⁵
Heat transfer coefficient α (cal/cm ² ·s·°C)	1.2 × 10 ⁻³	1.2 × 10 ⁻³	1.2 × 10 ⁻³	1.2 × 10 ⁻³

板コンクリートに厚さ3cmのモルタルで接着されている外壁モデルのモルタル部で剝離層を有するモデル試験体を用いて、定常および非定常熱伝導解析を行った。解析要因としては、内気温を20°Cの一定とし、外気温（愛知工業大学2号館屋上の平成3年2月、5月、8月および11月における午前6時～午後6時までの月平均気温履歴の4種類（図-2参照）、剝離部の大きさ（5x5cm、10x10cmおよび25x25cmの3種類、ただし剝離厚さは一律に0.1cm）、外壁表面から剝離位置までの深さ（1cmおよび3.9cmの2種類）並びに剝離層数（1重および2重剝離の2種類）を取り上げた。モデルを構成する材料の各種物理性質を表-2に示す。解析に際しては、モデル試験体側面の境界条件は断熱状態と仮定して、まず午前6時に

における外気温（2月：1.4°C、5月：13.0°C、8月：22.9°C、11月：8.7°C）について定常熱伝導解析を行い、その時点での試験体内部の温度分布を求めた。次に、定常熱伝導解析によって得られた温度分布結果を試験体の初期内部温度分布と仮定し、時間増分を10分に設定して午後6時までの非定常熱伝導解析を行った。

3. 解析結果とその考察

3.1 定常解析結果

図-3および図-4は、剝離部の大きさが10x10cmで剝離深さが3.9cmの場合の解析結果のうち、それぞれ2月および8月に関する温度分布の立体図を

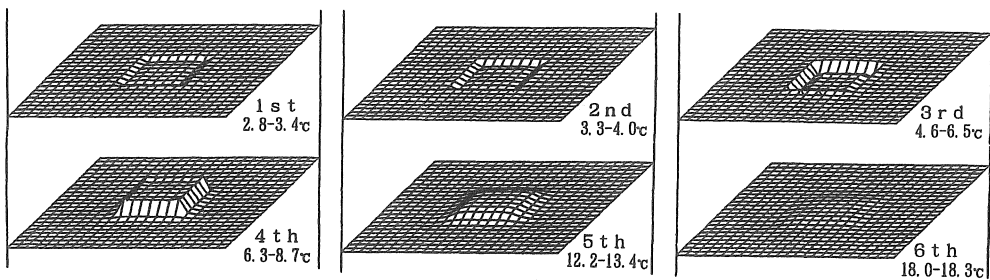


Fig. 3 Temperature distribution (February, depth=3.9 cm).

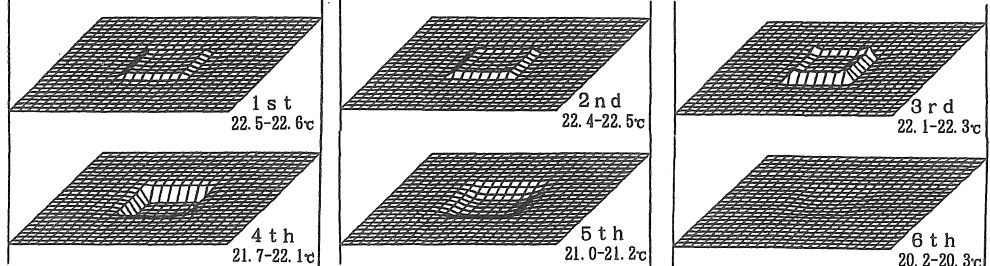


Fig. 4 Temperature distribution (August, depth=3.9 cm).

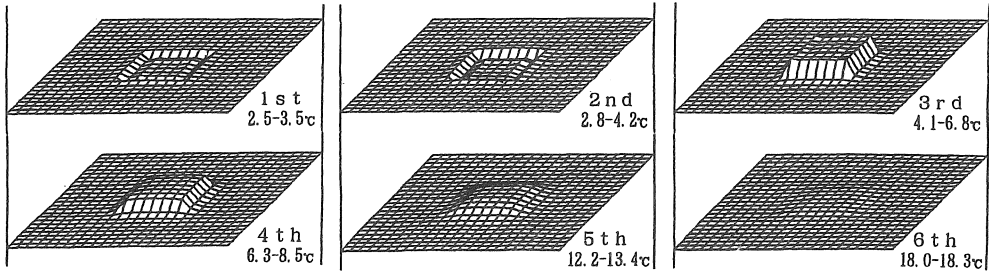


Fig. 5 Temperature distribution (February, depth=1.0 cm).

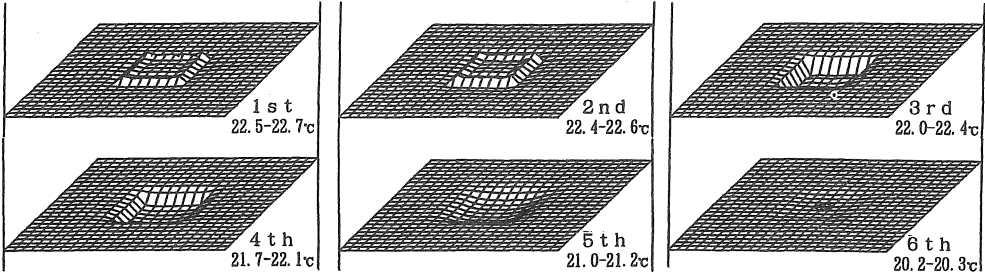


Fig. 6 Temperature distribution (August, depth=1.0 cm).

層別に示したものである。また、図-5および図-6は、外壁タイルの剥離深さが1cmの場合の2月および8月に関する結果を示したものである。これらの図によれば、外気温が内気温(20°C)よりも低い2月の場合、表面(図の1層目)の温度分布は、剥離位置直上部の温度が健全部の温度と比較して0.6°C(剥離深さが3.9cmの場合)~1.0°C(剥離深さが1cmの場合)低くなっているが、外気温が内気温よ

りも高い8月の場合には、逆に0.1°C(剥離深さが3.9cmの場合)~0.2°C(剥離深さが1cmの場合)高くなっており、温度分布に及ぼす剥離の影響は、剥離深さが小さいほど著しいことがわかる。ただし、剥離層よりも深い部分(4層目以上)においては、上記の表面部の温度分布とは逆の傾向なり、かつ剥離直下底面部と健全底面部との温度差は、剥離深さおよび外気温にかかわらず0.1~0.3°Cとなっている。

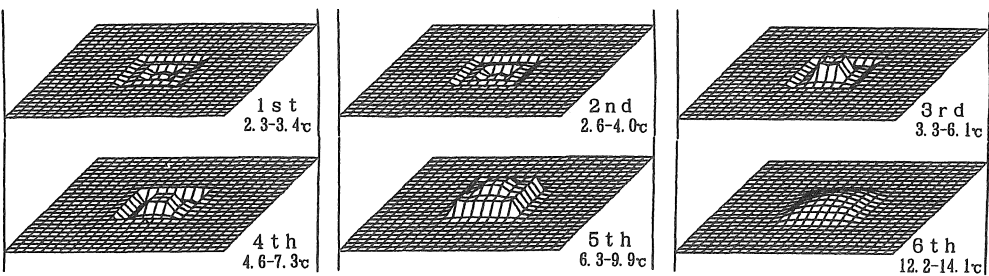


Fig. 7 Temperature distribution (February, separation size : 5x5cm+10x10cm).

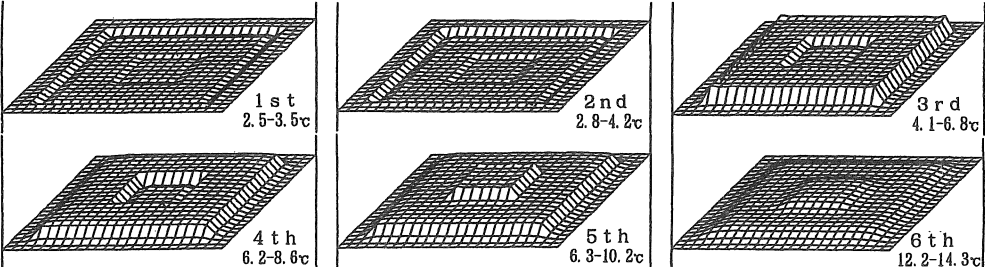


Fig. 8 Temperature distribution (February, separation size : 25x25cm+10x10cm).

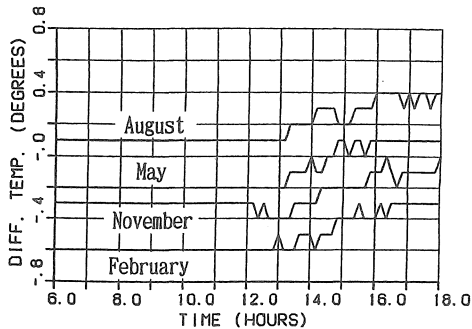


Fig. 9 Temperature difference (depth=3.9 cm).

図-7および図-8は、表面から3.9cmの深さに10x10cmの剝離層(厚さ=0.1cm)があり、かつ表面から1cmの深さに、それぞれ5x5cmおよび25x25cmの剝離層(厚さ=0.1cm)が存在する、いわゆる2重剝離の場合の解析結果を2月の場合について示したものであるが、定性的な傾向は、上記の1重剝離の場合の結果を重ね合わせたような結果となることがわかる。

3.2 非定常解析結果

図-9は、剝離部の大きさが10x10cmで剝離深さが3.9cmの場合の剝離位置直上表面部と健全表面部との温度差を、解析月別に示したものである。図によれば、いずれの場合も正午までの範囲では温度変化が全く観察されていない。この原因としては、本非定常解析では、試験体内部の初期温度分布として、便宜的に午前6時のときの外気温に対する定常解析結果を用いていることが挙げられる。この点については、今後さらに検討する必要がある。一方、正午以降の温度変化に注目してみると、午前6時~午後6時の範囲における外気温が内気温(20℃)よりも低い2月および11月については、温度差の絶対値は、時間が経過して外気温が内気温に近づいていくとともに次第に小さくなっているが、外気温が内気温よりも高い8月の場合には、逆に時間の経過とともに温度差は大きくなる傾向を示している。これに対して、午前6時~正午の範囲では外気温が内気温よりも低いが、正午以降になると外気温が内気温よりも高くなっている5月の場合には、午後2時40分を境にして温度差が負から正に逆転している。

図-10は、2重剝離を想定した場合の結果を示したものであるが、この場合には、1層目の剝離深さ

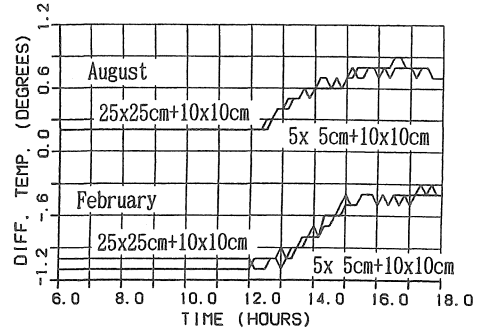


Fig. 10 Temperature difference (double separation).

が前掲の図-9の場合と比較して約3cm浅くなっているため、時間の経過に伴う温度変化はかなり著しくなっているが、定性的な傾向は図-9に示した1重剝離の場合と同様である。

以上のことから、外壁タイルの剝離状況と外壁温度分布との関係は、外気温だけでなく内気温にも影響を受けることがわかる。したがって、外壁温度分布から外壁タイルの剝離状況を正確に推定するためには、外気温と内気温との相互作用の影響を十分に確認しておく必要があるといえる。

4. 結論

本研究では、サーモグラフィ法による外壁タイルの剝離評価方法を確立するための基礎的研究として、タイルの剝離状況と外壁温度の分布状況との関係について解析的に検討を行った。本研究で得られた結果を要約すると、およそ次のようにまとめられる。

- 1) 外気温が内気温よりも低い場合、外壁タイル剝離部の表面温度は健全部の表面温度よりも低くなるが、外気温が内気温よりも高い場合には、剝離部の温度は健全部の温度よりも逆に高くなる。
- 2) 外壁表面の温度分布に及ぼすタイル剝離の影響は、外壁タイルの剝離深さが小さくなるほど著しいが、内壁温度分布については、剝離深さの影響を殆ど受けない。
- 3) 外壁温度分布の経時変化から外壁タイルの剝離状況を正確に推定するためには、外気温だけでなく内気温の影響についても十分に確認しておく必要がある。

【謝 辞】

本研究の実施に際して貴重な気温観測データを提供して頂いた愛知工業大学の比嘉俊太郎教授、並びに本解析プログラムおよび図形処理プログラムの作成に際して後助力を得た愛知工業大学4年生の惣田篤子嬢、桃木佳子嬢および吉井尚世嬢に対して謝意を表します。なお、本研究費の一部は東海学術振興財団の研究助成金によったことを付記し、謝意を表す。また、数値計算に際しては、愛知工業大学計算機センターのスーパーコンピュータCRAY・X-MP / 14 s eを使用したことを付記する。

【参考文献】

- 1) 山田和夫・小阪義夫：火害を受けたコンクリート中を伝播する超音波の減衰特性に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、第10巻、第2号、pp. 361-366、1988. 6
- 2) 山田和夫・小阪義夫：極低温下に曝されたコンクリート中を伝播した超音波の減衰特性に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、第11巻、第1号、pp. 331-336、1989. 6
- 3) 山田和夫・土屋宏明・小阪義夫：超音波スペクトロスコープによるコンクリートの劣化度評価に関する基礎的研究、材料、第8巻、第431号、pp. 956-965、1989. 8
- 4) 山田和夫・小阪義夫：アルカリ骨材反応を生じたモルタル中を伝播した超音波の減衰特性に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、第12巻、第1号、pp. 773-778、1990. 6
- 5) 山田和夫・小阪義夫：超音波スペクトロスコープによるコンクリートの劣化度評価に関する研究、セメント・コンクリート論文集、No. 44、pp. 288-293、1990. 12
- 6) 山田和夫・山本正岳：弾性波法を適用したコンクリート内部の空隙および鉄筋位置の推定に関する解析的研究、コンクリート工学年次論文報告集、第13巻、第1号、pp. 485-490、1991. 6
- 7) 山田和夫・山本正岳：弾性波法を適用したコンクリート内部の空隙および鉄筋位置の推定に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文報告集、第13巻、第1号、pp. 491-496、1991. 6
- 8) 山田和夫・山本正岳：弾性波法による外壁タイルの剝離およびコンクリートのひび割れ評価に関する実験的検討、セメント・コンクリート論文集、No. 45、pp. 394-399、1991. 12
- 9) 山田和夫・山本正岳：弾性波法による外壁タイルの剝離およびコンクリートのひび割れ評価に関する解析的検討、セメント・コンクリート論文集、No. 45、pp. 400-405、1991. 12
- 10) 山田和夫・山本正岳・浅井陽一：コンクリート内部の弾性波動伝播特性に関する基礎的研究、コンクリート工学年次論文報告集、第14巻、第1号、pp. 697-702、1992. 6

(受理 平成5年3月20日)